

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ПРОЦЕСС КРАТЕРООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В.А. Шулов, А.Н. Громов, Д.А. Теряев, А.Д. Теряев

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия, shulovva@mail.ru*

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии режимов облучения сильноточными импульсными электронными пучками на процесс кратерообразования на поверхности мишеней из жаропрочных титановых сплавов ВТ6, ВТ8 и ВТ9. Рассмотрены наиболее вероятные механизмы протекания явления кратерообразования.

### Введение

Целью настоящего исследования являлось изучение причин протекания явления кратерообразования на поверхности образцов из титановых сплавов при их облучении СИЭП в сравнении с результатами, зафиксированными при использовании мощных ионных пучков [1-3], а также при облучении мишеней из жаропрочных сталей СИЭП, как это было реализовано в [4]. В этой связи здесь были использованы терминология и методика, описанные в этих публикациях.

### Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве мишеней, подвергаемых электроно-лучевой обработке, использовались лопатки КВД и модельные образцы (диски диаметром 15 мм и толщиной 3 мм, изготовленные из прутков  $\alpha$ + $\beta$ -титановых сплавов (ВТ6, ВТ8 и ВТ9) с помощью механической и термической обработки по упрочняющим режимам [1]. Облучение мишеней СИЭП проводилась на ускорителе «Геза-ММП» [4] при следующих значениях параметров облучения: энергия электронов - 115-120 кэВ; длительность импульса - 20-40 мкс; плотность энергии в пучке и количество импульсов варьировались от  $w=16-18$  Дж/см<sup>2</sup>,  $n=1$  имп. до  $w=32-36$  Дж/см<sup>2</sup>,  $n=5$  имп., соответственно; площадь поперечного сечения пучка - 30-80 см<sup>2</sup> при неоднородности распределения плотности энергии по сечению пучка менее 10 % [4]. После облучения поверхностные слои образцов и лопаток исследовались методами электронной Оже-спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и оптической металлографии. Часть облученных мишеней подвергалась вакуумному отжигу для стабилизации физико-химического состояния в течение 6 ч при температурах 530-560°C. Также проводились усталостные испытания образцов при частоте нагружения 3000 Гц на воздухе при 20 и 450°C. Поверхность изломов изучалась методом электронной фрактографии.

### Экспериментальные данные и их обсуждение

Зафиксированные методом сканирующей электронной микроскопии результаты анализа топографии поверхности образцов из жаропрочных сплавов позволили авторам работ [1-4] клас-

сифицировать формируемые кратеры по форме и рельефу: круглые многокольцевые, круглые с выпуклостью в центре, круглые с вогнутостью в центре, эллиптические, смежные, ограниченные и забоинообразные. Проведенный в [4] анализ состояния поверхности образцов из стали ЭП866ш, облученных в ускорителе «Геза-1» с высокими плотностями энергии в импульсе  $w>26-30$  Дж/см<sup>2</sup>, методами СЭМ и оптической металлографии позволил выявить только три типа кратеров из вышеперечисленных: круглые с выпуклостью в центре, круглые с вогнутостью в центре и смежные. Результаты аналогичных исследований, реализованных в настоящей работе, свидетельствуют о возможности формирования на поверхности мишеней из титановых сплавов следующих типов кратеров: круглые с выпуклостью в центре, круглые с вогнутостью в центре, круглые многокольцевые и смежные (рис. 1).

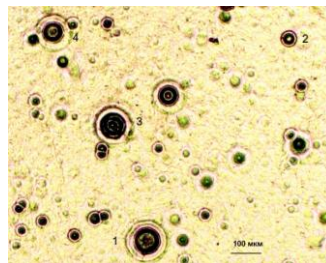


Рис. 1. Внешний вид кратеров с вогнутостью в центре 1, с выпуклостью в центре 2, круглого многокольцевого 3 и смежного 4 кратеров, сформированных при облучении образцов из сплава ВТ9 при  $w=26-28$  Дж/см<sup>2</sup> и длительности импульса 25 мкс.

Данный факт позволяет сделать заключение о более высокой перспективности использования импульсных электронных пучков в качестве инструмента для поверхностной модификации деталей из титановых сплавов, поскольку наиболее опасными кратерами, с точки зрения усталостной прочности и коррозионной стойкости, являются забоинообразные, ограниченные и смежные кратеры [1-4].

Таким образом, один из трех типов наиболее опасных кратеров при облучении СИЭП вообще не образуются на поверхности образцов и лопаток из титановых сплавов. В настоящей работе, как и в публикациях [1-4], для изучения влияния предварительной обработки на кратерообразова-

ние при облучении сильноточным импульсным электронным пучком были изготовлены образцы диаметром 15 мм и толщиной 5 мм из титановых сплавов ВТ6, ВТ8 и ВТ9, которые проходили различную предварительную обработку (фрезерование, шлифование, виброабразивная обработка, поверхностное пластическое деформирование микрошариками, полирование, химическое травление и окисление на воздухе при 450<sup>0</sup>С в течение 6 ч). Облучение этих образцов осуществлялось в идентичных условиях при одной загрузке по 5 мишеней в серии при плотности энергии 32-36 Дж/см<sup>2</sup>. После облучения поверхность мишеней анализировалась с помощью оптической металлографии, по результатам которой определялись плотность распределения кратеров по поверхности, а также их максимальный и минимальный диаметры. Некоторые, наиболее важные из полученных данных, представлены в таблице 1 и на рис. 1-5. По аналогии с анализом результатов, зафиксированных после обработки сильноточным электронным пучком мишеней из стали ЭП866ш [1], можно сделать следующие заключения из приведенных в таблице 1 и на рис. 2, 3 данных: предварительная механическая обработка оказывает существенное влияние на процесс кратерообразования (чем жестче условия воздействия на материал, тем большее количество кратеров появляется на поверхности); тонкое ручное полирование позволяет после воздействия пучка одним импульсом зафиксировать равномерно оплавленную поверхность почти без кратеров; на образцах, приготовленных с использованием фрезерования, шлифования и виброабразивной обработки, не наблюдалось упорядоченного расположения кратеров; химическое травление полированных образцов не вызывает при облучении образование очень большого числа кратеров; после облучения с высокими плотностями энергии образцов, изготовленных с помощью тонкого полирования с нанесенными на их поверхность отдельными царапинами, кратеры, если они и формируются, то никак не связаны

Таблица 1. Влияние предварительной обработки на размеры и распределение кратеров по поверхности образцов из сплава ВТ8, облученных СИЭП: E=115-120 кэВ; w=32-36 Дж/см<sup>2</sup>; n=1 имп; t=30 мкс (D<sub>min</sub> – минимальный размер кратеров, D<sub>max</sub> – максимальный размер кратеров, ρ – плотность распределения кратеров).

	Исходная обработка	D <sub>min</sub> мкм	D <sub>max</sub> мкм	ρ см <sup>-2</sup>
1	Фрезерование	1.5	840	18
2	Шлифование	1.4	790	15
3	Вибро-абразивная	0.5	520	14
4	Обработка микрошариками	1.5	190	29
5	Полирование	35	620	3
6	Полирование и отжиг	42	650	2
7	Полирование и окисление	36	600	4
8	Полирование и травление	39	540	8

с наличием царапин, края которых достаточно равномерно оплавлены; после облучения с низкими плотностями энергии w<18-20 Дж/см<sup>2</sup>, вне зависимости от предварительной обработки, кратеры на поверхности практически отсутствуют; микротвердость в окрестности формируемых кратеров с выпуклостью в центре всегда оказывается существенно ниже (сплав ВТ9, H<sub>μ</sub>=300+15 ед. НВ при p=1 Н), чем на свободной от них поверхности (H<sub>μ</sub>=360+20 ед. НВ при p=1 Н) и в окрестности кратеров с вогнутостью в центре (H<sub>μ</sub>=345+15 ед. НВ при p=1 Н)

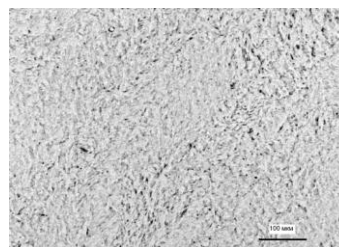


Рис. 2. Топография поверхности образцов из сплава ВТ9, прошедших фрезерование, шлифование, полирование и электронно-лучевую обработку 7 импульсами при w= 18-20 Дж/см<sup>2</sup> и t= 30 мкс.

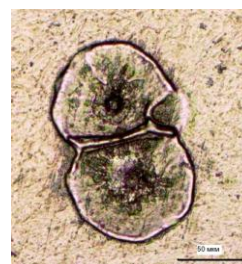


Рис. 3. Топография поверхности образцов из сплава ВТ9, прошедших фрезерование, шлифование, полирование и электронно-лучевую обработку при w= 32-36 Дж/см<sup>2</sup> и t=30 мкс (на поверхности присутствует конгломерат с высоким содержанием никеля).

Исходя из приведенных результатов, для образцов из α+β-титановых сплавов наиболее вероятными механизмами образования кратеров из приведенных ранее и сформулированных в работах [1-4] представляются: избирательное плавление и последующая эрозия отдельных участков поверхности (механизм 5); избирательное плавление и плазмообразование, обусловленные высокой степенью неоднородности распределения плотности дислокаций по поверхности (механизм 8); нестационарное и различное по глубине плавление отдельных участков поверхности с различной ориентацией (механизм 6), и взрывная эмиссия с острых участков поверхности (механизм 7). Еще одним важным результатом изучения явления кратерообразования явилось формирование при облучении с низкими плотностями энергии микродефектов дырочного типа на поверхности лопаток из сплавов ВТ8 и ВТ9, прошедших виброглянцевание (рис. 4). Скорее всего, этот тип дефектов формируется в самый последний момент действия импульса или уже после его завершения, когда начинает протекать процесс высокоскоростной кристаллизации.

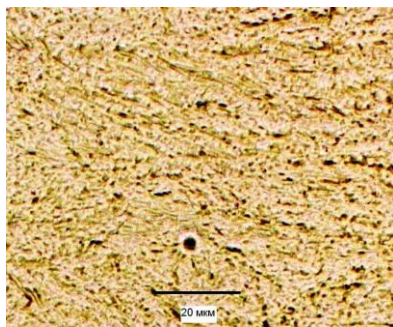


Рис. 4. Топография поверхности лопаток из сплава ВТ9, облученных СИЭП при плотности энергии 18-20 Дж/см<sup>2</sup> и длительности импульса 30 мкс (на поверхности присутствуют микродефекты дырочного типа).

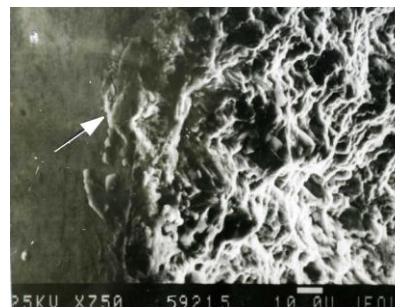


Рис. 5. СЭМ изображение поверхности усталостного излома образцов из сплава ВТ8 после облучения при 18-20 Дж/см<sup>2</sup> четырьмя импульсами и усталостных испытаний при нагрузке 300 МПа и частоте нагружения 3000 Гц.

В работе [5] предложен физический механизм кратерообразования, который объясняет большинство закономерностей, зафиксированных нами при экспериментальном исследовании этого явления при облучении мишеней из титановых сплавов СИЭП, сущность которого состоит в том, что под действием электронного пучка поверхность мишени начинает двигаться с ускорением  $10^9$ - $10^{11}$  м/с<sup>2</sup>, создавая реальные условия для возбуждения на ней гравитационных волн с пространственным масштабом единицы – десятки мкм [5]. Зародышами таких волн могут быть локальные микро-выступы или микро-впадины высотой десятки – сотые доли микрона. После прекращения действия пучка и, как следствие, ускорения, фаза гравитационной волны сменяется фазой развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. В результате, микрон неоднородность поверхности вырастает в кратер. Очевидно, что предложенный в [5] подход качественно объясняет практически все результаты, полученные и представленные здесь для титановых сплавов, а также в работе [1] для сталей ферритного класса. Наличие кратеров приводит к резкому снижению усталостной прочности деталей из титановых сплавов. Очаги разрушения в этом случае находятся непосредственно в окрестности сформированных кратеров (рис. 5).

### Заключение

Экспериментально изучен процесс кратерообразования, протекающий на поверхности лопаток и образцов из  $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при их облучении высокоэнергетическими импульсными электронными пучками с плотностями энергии в импульсе 20-36 Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что для таких мишеней наиболее вероятными механизмами образования кратеров являются: избирательное плавление и плазмообразование; нестационарное и различное по глубине плавление отдельных участков поверхности с различной ориентацией и взрывная эмиссия с острых участков поверхности.

Работа выполнена в соответствии с заданием Минобрнауки.

### Список литературы

1. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Львов А.Ф. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 1. С. 9-15.
2. Yatsui K. J. // Laser and Particle Beams. 1989. V. 7. P. 733-749.
3. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночовная Н.А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1995. № 6. С. 77-91.
4. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Белов А.Б., Энгелько В.И. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 2. С. 32-41.
5. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 3. С. 1-9.

## THE EFFECT OF IRRADIATING REGIMES WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS ON CRATER CREATION TAKING PLACE ON THE SURFACE OF TARGETS FROM TITANIUM ALLOYS

V.A. Shulov, A.N. Gromov, D.A. Teryaev, A.D. Teryaev

Moscow Aviation Institute,

4 Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russia, shulovva@mail.ru

The present paper reviews the experimental results dedicated by the effect of the irradiation conditions by intense pulsed electron beams on crater creation taking place on the surface of VT6, DN8, VT9 refractory titanium alloy targets. The most probable mechanisms of crater creation are also analysed.